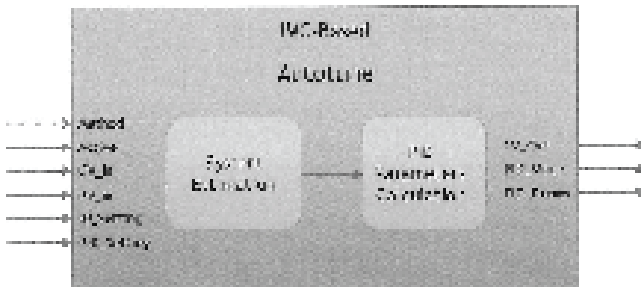


כיוול אוטומטי של פרמטרי בקר PID מבוסס IMC

ש. פרץ, ע. סלפטי, צ. כהנה, ג. זיידנר, א. דמרי, א. אלנבוגן, מ. ארז, י. קדמון

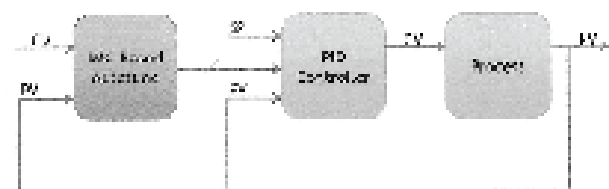
מבנה סכמתי:

האלגוריתם בנוי משני מרכיבים עיקריים:
System identification - תפקידו לבצע שערור של המערכת המבוקרת בחוג פתוח. תהליך שערור המערכת יכול להתבצע בשתי שיטות שיוסברו בהמשך.
pid Parameters Calculation - תפקידו לחשב את פרמטרי pro-n בהתאם לקבועי המערכת שזוהו בשלב הראשון.
 בנוסף, האלגוריתם מאפשר שליטה בפרמטרים שונים המשפיעים על שיטת הדגימה והשערור, סוג הבקר, מקדם האגרסיביות של חוג הבקרה וכדומה, לצורך התאמה למערכות שונות.



איור 1 - מבנה כללי של אלגוריתם ה-AUTOTUNE

שילוב האלגוריתם בחוג הבקרה בזמן אמת:



איור 2 - אופן שילוב הפונקציה במערכת

האלגוריתם משתלב בחוג הבקרה באמצעות שליטה בבקר ה-PID. במהלך שלב הפעולה הראשון בו מתבצע השערור, האלגוריתם למעשה מנטרל את ה-PID ומספק אות שליטה (cv - Control Value) למערכת בעצמו. באופן כזה המערכת יכולה לעבוד בחוג פתוח. אות המדידה (PV - Process Value) מוחזר ככניסה לאלגוריתם לצורך ביצוע דגימות אשר באמצעותן מתבצע השערור. בתום תהליך שערור המערכת,

מבוא

הבים מהתהליכים אותם נדרש לבקר, ניתן לקרב למערכות מסדר ראשון עם זמן מת קצר יחסית. במקרים רבים, דרישות הבקרה עבור מערכות אלו אינן גבוהות במיוחד - לא נדרש דיוק גבוה בערך היעד, מהירות ההגעה אליו אינה קריטית ואין הגבלה משמעותית של סטיית היתר המותרת. בבואנו לפתח את חוג הבקרה עבור מערכת מסוג זה עולה הדילמה הבאה:

מצד אחד, ניתן להשתמש בחוגי בקרה סטנדרטיים הפשוטים יחסית לשימוש ומימוש ולכיל את הפרמטרים עבורם בשיטות שאינן דורשות הכנה מוקדמת, כגון ניסוי וטעייה. החיסרון במקרה זה נובע מכך שדווקא שיטות אלו עלולות לגזול זמן רב בהרצה בשטח ובסיומן, גם לאחר הבאתן למצב בו הן עומדות בדרישות התהליך, אין ערובה לכך שמתקבלת מערכת אופטימאלית.

מצד שני, אפשר לפתח או להתאים חוג בקרה ייעודי בשיטות המתבססות על מודל משוערך של המערכת ולכילו בשיטות אנליטיות או נומריות כך שנוכל להביא לקיצור בזמני הכיוול בשטח ולקבלת תפקוד אופטימאלי ככל האפשר של המערכת. ברם, פעולות אלו דורשות השקעת זמן לא מבוטלת עבור שערור המודל, תיקופו ופיתוח חוג הבקרה שיתכן ואינם הכרחיים במקרים של מערכות שניתן לקרבן לסדר ראשון.

כיום, קיימות שיטות תיאורטיות רבות לביצוע בקרת תהליכים אופטימאלית, אולם שיטות אלו באות לידי יישום לעתים רחוקות בלבד, בעיקר כאשר ישנן דרישות מחמירות לגבי בטיחות או איכות התהליך, גם פרוצדורות רבות לכיוול אוטומטי קיימות מזה זמן רב, אך רובן אינן באות לכדי שימוש, כאשר אחד הגורמים העיקריים לכך הוא הצורך בהבנה מעמיקה ברקע התיאורטי הרלוונטי.

לאור זאת, עבור מערכות אלו (הניתנות לקירוב למערכות מסדר ראשון), עולה הצורך בחוג בקרה מוכח, פשוט לשימוש וליישום, ניתן לכיוול באמצעים אנליטיים וניתן לתיקוף, כל זאת תוך השקעה מינימאלית של זמן. במאמר זה מוצע אלגוריתם המבוסס על יישום שיטת IMC (internal Model Control) באמצעות חוג PID, יחד עם פיתוח שיטת כיוול מתאימה, כך שמתקבל כלי המסוגל לבצע זיהוי מערכת וכיוול אנליטי של פרמטרי חוג הבקרה בזמן אמת. פתרון זה יכול לשמש כמענה לבעיה אותה תארנו. בהמשך מוצגים ניסויים שבוצעו לבחינת האלגוריתם עבור מערכות שונות והתוצאות שהתקבלו [2].

אותו קצב דגימה. חישוב הנגזרת השנייה משמש לצורך שערך משך הזמן המת של המערכת.

באופן תיאורטי היה מספיק לחשב את הנגזרת הראשונה ולקבוע את משך הזמן המת לפי הזמן בו היא מקבלת ערך מקסימאלי, אך בדיקות מקדימות הראו כי חישוב זה מכניס השהייה הנגרמת כתוצאה מצורת חישוב הנגזרת. הסיבה לכך היא העובדה כי פונקציית נגזרת היא פונקציה לא סיבתית וממומשת בפועל באופן דיסקרטי ולא רציף, ולכן הנגזרת ברגע נתון מתקבלת רק לאחר הדגימה הבאה.

לפיכך, מבוצע חישוב של הנגזרת השנייה (איור 4) על מנת לזהות את רגע התחלת התגובה בדיוק רב יותר.

בתום תהליך הדגימה ואגירת הנתונים, מבוצע חישוב של הגבר המערכת ע"י חלוקה של ערך אות המוצא הסופי בגובה המדרגה שניתנה בכניסה. בנוסף, מחושב קבוע הזמן של המערכת ע"י מציאת הזמן בו ערך המוצא הגיע ל-63% מערך המוצא וחישוב משך הזמן מאותה נקודה עד לרגע ההתייצבות.

היתרון בשיטה זו נעוץ בעובדה שהחישוב מתבצע על פי סדרה של ערכים אגורים, דבר שמספק תמונה טובה על צורת ההתנהגות של המערכת. כמו כן שיטה זו יחסית חסינה לרעשים שמתווספים לאות המדידה. החסרונות של השיטה הם הצורך לשמור ערכים בזיכרון והקושי בהגדרה מדויקת של חלון זמן הדגימה (דבר המצריך ידע מקדים על המערכת) - עבור חלון קצר מדי המערכת לא תגיע להתייצבות ועבור חלון ארוך מדי נקבל זמן ביצוע ארוך ומיותר וכמו כן ייפגעו רזולוציית הדגימה והדיוק או לחלופין ידרשו משאבי זיכרון רבים.

שערך זמן אמת:

גם בשיטה זו ניתן אות מדרגה בכניסת המערכת בחוג פתוח, אך בשונה מהשיטה הקודמת לא מתבצעת אגירה של דגימות אות המוצא אל תוך מערך. שיטה זו מסתמכת על העיקרון התיאורטי כי היחס בין ערך הנגזרת הראשונה המתקבלת עם תחילת תגובת המערכת (שהוא ערך המקסימום) לבין ערך הנגזרת, הראשונה ברגע T_p הוא קבוע השווה ל- $1/e$ (הוכחה בהמשך). ההגעה לשני ערכים אלו מתרחשת עוד בטרם התייצבות המערכת ולכן לא צריך להמתין לכך. זאת בניגוד לשיטה הקודמת בה מחפשים נקודת זמן בה ערך תגובת המערכת שווה ל-63% מהערך הסופי שעדיין לא ידוע, דבר המאלץ אותנו לשמור דגימות של כל תגובת המערכת.

התייצבות המערכת גם היא מחושבת על פי שאיפת הנגזרת הראשונה לאפס ולכן התהליך מסתיים מיד עם התייצבות המערכת ולא עם סיום חלון זמן המוגדר מראש (אשר עלול להיות ארוך/קצר מהנדרש). עם התייצבות המערכת מחושב ההגבר הסטטי שלה K_p באותו אופן בו חושב בשיטה הקודמת. כמו כן, גם זיהוי הזמן המת של המערכת θ מתבצע באותו האופן כמו בשיטה הקודמת.

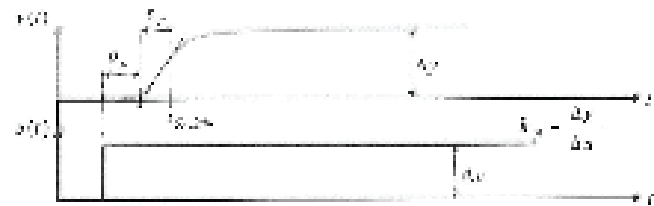
האלגוריתם מחשב את קבועי הכיול לבקר ה-10, מעביר אותם אל הבקר ומחזיר אותו לעבודה אוטומאטית. באופן כזה המערכת חוזרת לעבוד בחוג סגור והאלגוריתם מסיים את תפקידו [3].

זיהוי מערכת System Identification:

השלב הראשון מיועד לשערך מערך מסדר ראשון בעלות קבועי זמן שאינם זניחים, או לחילופין מערכות מסדר גבוה יותר הניתנות לקירוב למערכת מסדר ראשון. תהליך השערך מתחיל בהזנת אות מדרגה בכניסת המערכת בחוג פתוח. ברגע זה מתחילה להיווצר תגובה כלשהי במוצא המערכת אותה אנו מעוניינים לדגום. האלגוריתם מאפשר שתי שיטות דגימה ושערך בהתאם לבחירת המשתמש, כאשר לכל אחת יתרונות וחסרונות משלה.

לשתי השיטות מטרה זהה - לשערך את שלושת הפרמטרים המאפיינים מערכת מסדר ראשון:

- הגבר המערכת.
- זמן ההתייצבות.
- זמן מת.



איור 3 - שערך המערכת באמצעות תגובה למדרגה

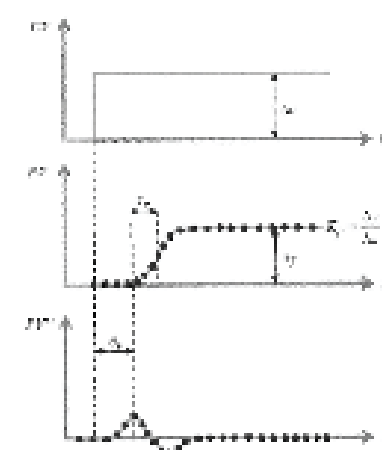
שערך מבוסס מערך:

בשיטה זו ניתן אות מדרגה בכניסת המערכת בחוג פתוח והמערכת מתחילה לייצר תגובה במוצא. תגובה זו נדגמת בפרקי זמן קבועים אל תוך מערך מסוג real, כאשר יש להגדיר מראש את משך זמן הדגימה באמצעות הפרמטר window T. משמעות הדבר היא כי למשתמש צריכה להיות הערכה לגבי משך זמן ההתייצבות. במקביל לאגירת דגימות אות המוצא במערך, מחושבת גם הנגזרת השנייה של אות המוצא לפי

```

%Tp -> [T]
%Kp -> [K]
%Tm -> [Tm]
%Tn -> [Tn]
%Tf -> [Tf]
%Tb -> [Tb]
%Tc -> [Tc]
%Td -> [Td]
%Tl -> [Tl]
%Tm -> [Tm]
%Tn -> [Tn]
%Tf -> [Tf]
%Tb -> [Tb]
%Tc -> [Tc]
%Td -> [Td]
%Tl -> [Tl]
%Tm -> [Tm]
%Tn -> [Tn]
%Tf -> [Tf]
%Tb -> [Tb]
%Tc -> [Tc]
%Td -> [Td]
%Tl -> [Tl]

```

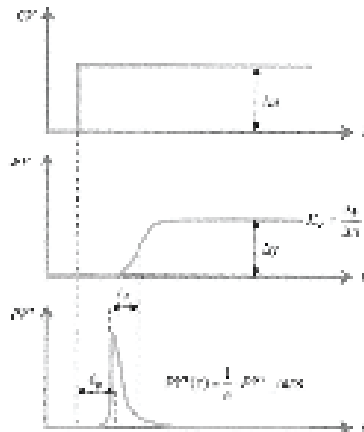


איור 4 - שערך מבוסס מערך



```

Step -> CV
Start counter n
If Pz(n) = max(Pz(n))
    Pz_max = Pz(n)
    M = n * sample_time
If Pz(n) / max(Pz(n)) > 1/n
    T = n * sample_time * phi
If Pz(n) < 0
    K = PV / CV
    
```



איור 5 - שערך זמן אמת

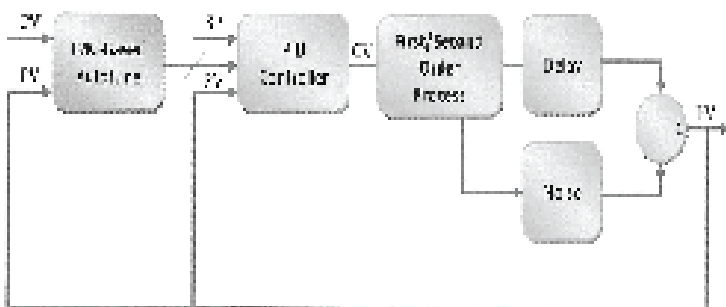
	T_d	T_s	T_t
PID	$\frac{1}{K_p} \left(\frac{r_p}{\lambda_p + T_c} \right)$	T_c	
IMC	$\frac{1}{K_p} \left(\frac{r_p - \lambda_p \phi}{\lambda_p + T_c - \lambda_p \phi} \right)$	$r_p - \lambda_p \phi$	$\frac{r_p}{\lambda_p + T_c}$

$T_c = P_{12} / (K_p \lambda_p + P_{11})$

טבלה 1 - PID parameters calculation

ניסויים ותוצאות:

לצורך ניסויים ובדיקות לאלגוריתם מומשה פונקציה לביצועו באמצעות תוכנת בקר תעשייתית. האלגוריתם נבדק עבור שתי מערכות שונות - מסדר ראשון ומסדר שני - באמצעות יצירת פונקציות סימולציה מתאימות בתוכנת הבקר המקבלות את מוצא בקר ה-PID. ההנחה הינה כי גם עבור מערכות מסדר שני ניתן לקבל באמצעות האלגוריתם (שפותח עבור מערכות מסדר ראשון, כזכור) חוגי בקרה העונים על דרישות בסיסיות. כל אחת מהמערכות נבדקה גם בנוכחות רעש שערך הממוצע הוא אחוז אחד מערך אות הבקרה.



איור 6 - סביבת הבדיקה

יתרונות שיטה זו נובעים מכך שאין צורך לשמור ערכים בזיכרון, קל מאוד לקבוע את רגע עצירת תהליך השערך וזמן השערך הוא המינימאלי האפשרי. לעומת זאת, חסרונות השיטה נובעים מהרגישות הגבוהה שלה לרעשים ומהעובדה שהחישוב מתבצע על סמך נקודה בודדת בזמן לעומת סדרה של ערכים בשיטה הקודמת. הוכחה מתמטית:

$$y(t) = y(0) \cdot e^{-\frac{t}{T}} + y(\infty) \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}})$$

$$PV'(t) = PV'(0) \cdot e^{-\frac{t}{T}} + CV \cdot e^{-\frac{t}{T}} (1 - e^{-\frac{t}{T}})$$

$$PV'(t) = -\frac{1}{T} PV'(0) \cdot e^{-\frac{t}{T}} + CV \cdot e^{-\frac{t}{T}} - \frac{1}{T} e^{-\frac{t}{T}}$$

$$PV'(t=0) = -\frac{1}{T} PV'(0) \cdot e^{-\frac{0}{T}} + CV \cdot e^{-\frac{0}{T}} - \frac{1}{T} = \frac{1}{T} (CV - PV'(0))$$

$$PV'(t=T) = -\frac{1}{T} PV'(0) \cdot e^{-\frac{T}{T}} + CV \cdot e^{-\frac{T}{T}} - \frac{1}{T} = \frac{1}{T} (CV - PV'(0)) e^{-1}$$

$$\frac{PV'(t=T)}{PV'(t=0)} = \frac{1}{e}$$

חישוב קבועי הבקרה (PID - parameters Calculation):

השלב השני שמבצע אלגוריתם ה-Autotune לאחר שלב שערך המערכת הוא חישוב אנליטי של פרמטרי חוג הבקרה. כאמור, אנו משתמשים בשיטת IMC המבוססת על פונקצית תמסורת הפוכה למודל המשוער כך שנקבל אות מוצא השווה לדרישה המגיעה במבוא. בקר ה-PID משמש הן ליישום פונקצית התמסורת ההפוכה והן לפיצוי על אי-דיוקים במודל. חישוב הפרמטרים מבוצע על פי נוסחאות המתאימות לבקר IMC מבוסס PID עבור מערכות מסדר ראשון, כפי המתואר בספרות המקצועית. נוסחאות אלו מופיעות בטבלה 1.

כל אחד מהניסויים כלל בדיקה של דיוק פרמטרי המערכת המשוערכת והתנהגות המערכת בחוג סגור בתום תהליך כיוול קבועי ה-PID, כאשר נבחנים שני סוגי כיוול – עבוד בקר PI ועבוד בקר PID.

לשם השוואה, כל אחת מהמערכות נבחנה גם באמצעות פונקצית כיוול מובנית הקיימת בתוכנת הבקר. גם פונקציה זו מתחילה את תהליך השערוך בהזנת שתי מדרגות אל כניסת המערכת. החיסרון בפונקציה זו נעוץ בעובדה שקוד הפעולה שלה סגור ועל כן אופן פעולתה אינו ברור ואינו גמיש לשינויים.

בקרת מערכת מסדר ראשון:

נתונים המערכת			
Transfer Function	Delay	Gain	Tau
$G(s) = \frac{1}{7.5s + 1}$	1 Sec	0.1	10

טבלה 2 – נתוני המערכת מסדר ראשון

שלב ראשון תהליך הכיוול:

נתונים המערכת עם הכיוול			
Method	Delay	Gain	Tau
אלגוריתם סבוסיס מערך	1s 500ms (2.80%)	0.0986286 (10.14%)	6s 400ms (8.33%)
אלגוריתם זמן אמת	1s 300ms (3.7%)	0.0987317 (10.27%)	7s (0%)

טבלה 3 – נתוני המערכת המשוערכים

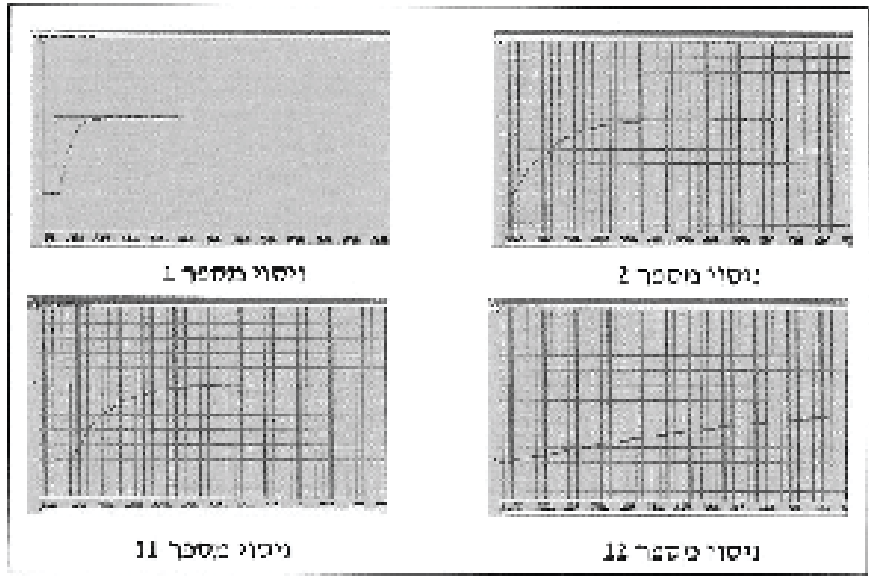
שלב שני בקרת המערכת בחוג סגור:

PID Automatic			קובצי הבקרה			הציונים		סדר מספר
Method	PI/PID	Performance	P	I	D	זמן התכנסות	Os Overshoot	
אלגוריתם סבוסיס מערך	PI	Aggressive	0.9890170	1s 400ms		40%	5%	1
		Moderate	0.1978031	1s 400ms		2%	0%	2
		Conservative	0.021978	1s 400ms		>10%	0%	3
	PID	Aggressive	1.754545	1s 200ms	1s 405ms	20%	15%	4
		Moderate	0.2683115	1s 200ms	1s 405ms	2%	0%	5
		Conservative	0.0283345	1s 200ms	1s 405ms	>10%	0%	6
אלגוריתם זמן אמת	PI	Aggressive	1.193572	7s		15%	5%	7
		Moderate	0.2387147	7s		1s 50%	0%	8
		Conservative	0.0285575	7s		>10%	0%	9
	PID	Aggressive	2.042185	1s 650ms	1s 255ms	50%	15%	10
		Moderate	0.0123316	1s 650ms	1s 255ms	1s 15%	0%	11
		Conservative	0.0139794	1s 650ms	1s 255ms	>10%	0%	12

טבלה 4 – תוצאות בקרת המערכת מסדר ראשון בחוג סגור

טבלה זו מרכזת את פרמטרי בקר ה-PID כפי שחושבו בכל אחד מ-14 הניסויים המתוארים בטבלה. כמובן ניתן לראות את זמן התכנסות המערכת אל הערך הרצוי ואת תגובת היתר כולות בבחירת מידת האגרסיביות של חוג הבקרה. כפי שניתן לראות בטבלה, מידת האגרסיביות משפיעה על עוצמת ההגבר של הרכיב היחסי בבקר ה-PID.

תוצאות אלו מושוות לתוצאות שהתקבלו מפונקציית הכיול המובנית בתוכנת הבקר. כאמור פונקציה זו סגורה ועל כן קשה להשוות בצורה מדויקת את הביצועים, אך ברמה איכותית ניתן לראות כי באמצעות האלגוריתם המוצע מתקבלות תוצאות דומות.



איור 7 – גרף התנהגות המערכת מסדר ראשון בחוג סגור

מהגרפים הנ"ל ומהערבים המופיעים בטבלה 4 ניתן לראות כי ככל שנבחרת התנהגות יותר אגרסיבית של חוג הבקרה (באמצעות הפרמטר), מתקבלת התכנסות מהירה יותר אל הערך הרצוי אך נוצרת תגובת יתר במוצא המערכת. לעומת זאת, מידת אגרסיביות נמוכה מביאה להגעה מדויקת לערך הרצוי אך בזמני התכנסות ארוכים יותר.
בקרת מערכת מסדר שני:

מסדר מערכת			
Transfer Function	Delay	Noise	CV_in
$G(s) = \frac{1}{(3s + 1)(5s + 1)}$	0.0000	0.0	10

טבלה 5 – נתוני מערכת מסדר שני

שלב ראשון תהליך הכיול:

ניתוני המערכת המשוערים			
Method	Delay	Gain	TS
אלגוריתם מבוסס מערך	4s_200ms (27.14%)	0.9992433 (0.08%)	6s_700ms
אלגוריתם זמן אמת	5s_200ms (62.56%)	0.9931285 (0.69%)	7s_300ms

טבלה 6 – נתוני המערכת המשוערים

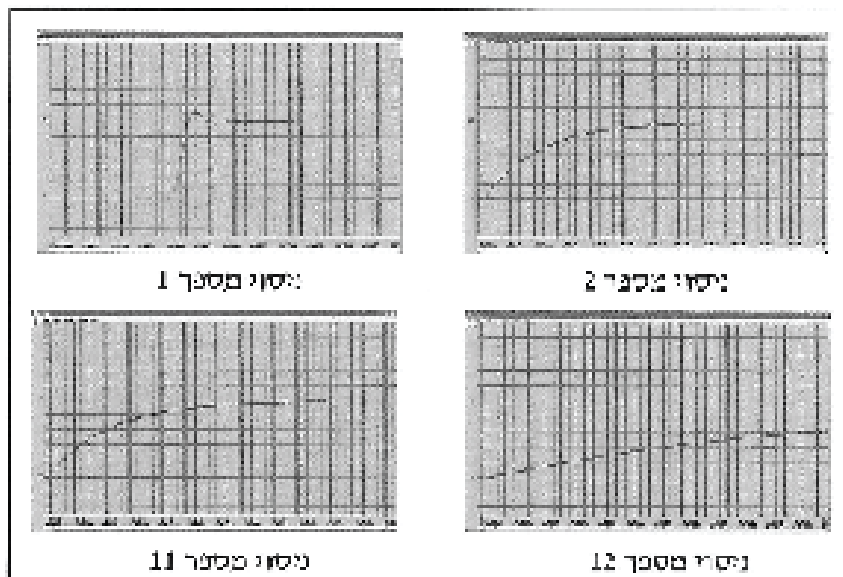
ניתן לראות כי במקרה של שערך של מערכת מסדר שני באמצעות אלגוריתם שמועד למערכות מסדר ראשון, מתקבלות שגיאות גדולות יותר בפרמטרים המשוערים. על כן פונקציה זו תהיה טובה לשימוש רק במערכות מסדר שני בעלות התנהגות מספיק איטית שתהיה דומה להתנהגות של מערכות מסדר ראשון.

שלב שני בקרת המערכת בחוג סגור:

TMC_Requirements		קבוצת הבקרה			בלבליט		סלולר ניסוי		
Method	PI/PID	Performance	P	I	D	זמן התגובה		אטאומט	
אנטי-רוטור מרוסס מסדר	PI	Aggressive	0.7750502	6s_700ms			1m12s	10%	1
		Moderate	0.135131	6s_300ms			4ms	0	2
		Conservative	0.01005475	6s_300ms			>10m	0	3
	PID	Aggressive	1.4194438	9s_100ms	1s_767ms		40s	8%	4
		Moderate	0.2191081	9s_100ms	1s_767ms		4ms	0	5
		Conservative	0.0235685	9s_100ms	1s_767ms		>10m	0	6
אנטי-רוטור זמן ארוך	PI	Aggressive	0.7161339	7s_500ms			1m	1%	7
		Moderate	0.1432948	7s_500ms			4.5m	0	8
		Conservative	0.0159305	7s_500ms			>10m	0	9
	PID	Aggressive	1.379246	10s_150ms	2s_50ms		50s	0%	10
		Moderate	0.2195435	10s_150ms	2s_50ms		1.5m	0	11
		Conservative	0.0322736	10s_150ms	2s_50ms		>10m	0	12

טבלה 7 – תוצאות בקרת מסדר שני בחוג סגור

טבלאות אלה מרכזות את פרמטרי בקר ה- PID למערכת מסדר ראשון ושני. כמו כן ניתן לראות את זמן התכנסות המערכת אל הערך הרצוי ואת תגובת היתר כתלות בבחירת מידת האגרסיביות של חוג הבקרה. כפי שניתן לראות בטבלה, מידת האגרסיביות משפיעה על עוצמת ההגבר של הרכיב היחסי בבקר ה- PID.



איור 8 – גרף התנהגות המערכת מסדר שני בחוג סגור

מהגרפים הנ"ל ומהערבים המופיעים בטבלה 4 ניתן לראות כי מתקבלת התנהגות דומה לזו שהתקבלה עבור מערכות מסדר ראשון מבחינת פרמטר האגרסיביות, זמני ההתכנסות ותגובת היתר.

Aidan O'Dwyer, "PI and PID Controller Tuning Rules: an Overview and Personal Perspective", Proceeding of the IET Irish Signals and Systems Conference, pp. 161-166, Dublin Institute of Technology, June, 2006.



נגב שי פרץ

מהנדס פיתוח מערכות בקרה - קריה
למחקר גרעיני - בעל תואר ראשון בהנדסת
חשמל - המכללה האקדמית להנדסה
S.C.E. סטודנט לתואר שני בהנדסה
גרעינית - אוניברסיטת בן גוריון B.G.U



ערן סלפטי

מהנדס פיתוח מערכות בקרה - קריה
למחקר גרעיני - נגב
בעל תואר ראשון בהנדסת חשמל ומחשבים
- אוניברסיטת בן גוריון
סטודנט לתואר שני בהנדסת חשמל



צחי כהנה

מהנדס פיתוח מערכות בקרה
עבודה: קריה למחקר גרעיני - נגב
השכלה: תואר ראשון בהנדסת חשמל,
תואר שני בהנדסת אלקטרו-אופטיקה

סיכום

במסגרת עבודה זו פותח אלגוריתם יעיל לכיול אוטומאטי בזמן אמת של בקר PID לביצוע בקרת חוג סגור עבור מערכת מסדר ראשון או כזו הניתנת לקירוב לסדר ראשון. יתרונות האלגוריתם טמונים גם בחסכון הזמן שהוא מציע - שימוש בבקר PID סטנדרטי ופשוט ליישום ללא צורך בשערוך מוקדם של מודל המערכת וגם ביעילותו - כיול הבקר באמצעות שיטה אנליטית (IMC) המבוססת על מודל משוערך של המערכת המתבצע בזמן אמת.

פעולת האלגוריתם נבחנה באמצעות סימולציה של שתי מערכות לדוגמא, מסדר ראשון ומסדר שני. גם בשלב זיהוי המערכת וגם בשלב חישוב הפרמטרים שהתקבלו עבור בקרת חוג סגור קיבלנו תוצאות הנותנות מענה לצרכים שהוגדרו. כמו כן בוצעה השוואה לפונקציות כיול הקיימות בתוכנת הבקר והתקבלו תוצאות קרובות המעידות גם הן על פעולה תקינה של האלגוריתם.

בנוסף, האלגוריתם מאפשר גמישות רבה באמצעות שליטה בפרמטרים שונים כדוגמת ביטול רכיב הבקר הדיפרנציאלי, קביעת אלגוריתם הכיול ועוד.

ביבליוגרפיה

- Ang, K.H. and Chong, G.C.Y and Li, Y. (2005) "PID Control system analysis, design, and technology", IEEE Transactions on Control systems technology 13(4): pp. 559-576.
- B. Wayne Bequette, "Process Control: Modeling, Design and Simulation", Prentice Hall Professional Reference: Upper Saddle River, NJ 2003.